

## Выводы

1. Приведена методика испытания смазочных материалов на противоизносные свойства с учетом механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте при граничном трении скольжения, оцениваемых электрохимическим методом.
2. Показано несовершенство существующей системы классификации смазочных материалов на противоизносные свойства. Так, масла группы SG имеют соответственно противоизносные

свойства 0,287 и 0,26 мм, а группы SL – 0,353 и 0,28 мм, причем масло группы SJ характеризуется наилучшими противоизносными свойствами. В этой связи при стандартизации предлагаемого метода оценки противоизносных свойств можно не только контролировать товарные масла на соответствие их группам эксплуатационных свойств, и, тем самым, повысить качество выпускаемой продукции, но и устанавливать группы с учетом физико-химических показателей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др. Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Изд. Центр «Техинформ», 1999. – 596 с.
2. Устройство для испытания трущихся материалов и масел: а.с. 983522 СССР; опубл. 1982, Бюл. № 47.
3. Способ определения смазывающей способности масел: а.с. 1054732 СССР; опубл. 1983, Бюл. № 42.
4. Способ определения смазывающей способности масел: а.с. 2186386 СССР; опубл. 2002, Бюл. № 21.
5. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов: а.с. 2057326 Рос. Федерация; опубл. 1996, Бюл. № 9.

Поступила 18.12.2009 г.

УДК 621.892.1

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО МОТОРНОГО МАСЛА НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ СТОЙКОСТЬ

Б.И. Ковальский, С.Б. Ковальский, А.В. Берко, Н.Н. Малышева

ФГОУ ВПО Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа, г. Красноярск  
E-mail: Labsm@mail.ru

Приведены результаты испытания минерального моторного масла М10-Г<sub>2</sub>к на температурную стойкость и определено влияние продуктов деструкции на противоизносные свойства и износостойкость стали ШХ15.

### Ключевые слова:

Моторное масло, температурная стойкость, продукты деструкции, коэффициент относительной вязкости, коэффициент летучести, коэффициент поглощения светового потока, коэффициент износа.

### Key words:

Motor oil, temperature stability, products of destruction, factor of relative viscosity, factor of volatility, light flux absorption factor, factor of deterioration.

Проблема трения, смазочного действия и износа напрямую определяет надежность объектов машиностроения. При решении трибологических задач используются качественные представления об оптимизации шероховатостей поверхностей, о закономерностях приработки, противозадирной стойкости и антиокислительной стабильности смазочных материалов, гетерогенности структуры антифрикционных материалов и совместимости материалов пар трения [1].

Одной из актуальных задач в этой области является расширение температурного диапазона работоспособности смазочных материалов. Решение этой задачи достигается введением поверхностно-

активных или химически-активных соединений, образующих тонкие слои продуктов взаимодействия активных компонентов смазочной среды с материалами поверхностей трения [2]. Эти слои обладают пониженным сопротивлением сдвигу и имеют более высокую температурную стойкость, чем исходный смазочный материал.

Для снижения потерь на трение большое внимание уделяется разработке специальных антифрикционных присадок, именуемых модификаторами трения [3], проявляющих эффективное действие при высоких температурах, характерных, в частности, для зоны цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. Нагрузочно-скоростные

режимы работы трибосистемы, одним из элементов которой является смазочный материал, определяют температурный режим, поэтому основным требованием к нему является температурная стойкость. Наряду с вышеперечисленными существует малоисследованная проблема повышения работоспособности подшипников качения, изготовленных из одного материала, но работающих в различных смазочных средах и температурных условиях. В этой связи имеет важное научное и практическое значение объяснение механизма действия смазочной среды при различных температурах на износостойкость подшипниковой стали.

Целью настоящей работы является исследование влияния температур в диапазоне от 140 до 240 °С на противоизносные свойства минерального масла М10-Г<sub>2</sub>к и изменение износостойкости покрытий, образующихся на поверхностях стали ШХ15 при термостатировании.

Испытания минерального масла М10-Г<sub>2</sub>к проводились на трехшариковой машине трения со схемой трения «шар-цилиндр» [4]. В качестве образцов использовалась обойма конического шарикоподшипника 7208 диаметром 80 мм и шарики диаметром 9,2 мм. Трение трех шариков проводилось по индивидуальным дорожкам трения, а через одну пару трения пропускался постоянный ток от стабилизированного источника напряжения 3 В, величиной 100 мкА [5]. Противоизносные свойства термостатированных проб масел оценивались по диаметру пятна износа.

Параметры трения составили: нагрузка 13 Н, скорость скольжения 0,68 м/с, температура испытания 80±0,5 °С. Пробы масла массой 100±0,1 г испытывались в специально разработанном приборе для определения температурной стойкости, где оно подвергалось термостатированию в течение 7 ч при

температурах от 140 до 240 °С совместно с обоймой подшипника при атмосферном давлении. Температура испытания поддерживалась автоматически с помощью терморегулятора ТР101. Температурная стойкость испытуемой пробы оценивалась по изменению вязкости, коэффициента поглощения светового потока и летучести, которые измерялись соответственно на вискозиметре, спектрофотометре и электронных весах.

Противоизносные свойства оценивались при испытании масла на машине трения с обоймами без термостатирования их в масле и с термостатированием. Температура термостатирования задавалась ступенчато через 20 °С – от 140 до 240 °С.

Влияние температуры на изменение свойств минерального моторного масла оценивалось коэффициентами поглощения светового потока, измеряемого на спектрофотометре ПЭ-5300 В, относительной вязкости и летучести (рис. 1).

Коэффициент относительной вязкости определялся отношением

$$K_{\mu} = \mu_t / \mu_{исх},$$

где  $\mu_t$  и  $\mu_{исх}$  – соответственно вязкости термостатированного и исходного масел, сСт.

Коэффициент летучести определялся отношением

$$K_G = m/M,$$

где  $m$  и  $M$  – соответственно масса испарившегося и оставшегося масла в пробе после термостатирования, г.

С увеличением температуры испытания (рис. 1, а) наблюдается увеличение коэффициента поглощения светового потока; величина этого коэффициента в диапазоне температур от 160 до 220 °С изменяется слабо. Относительная вязкость

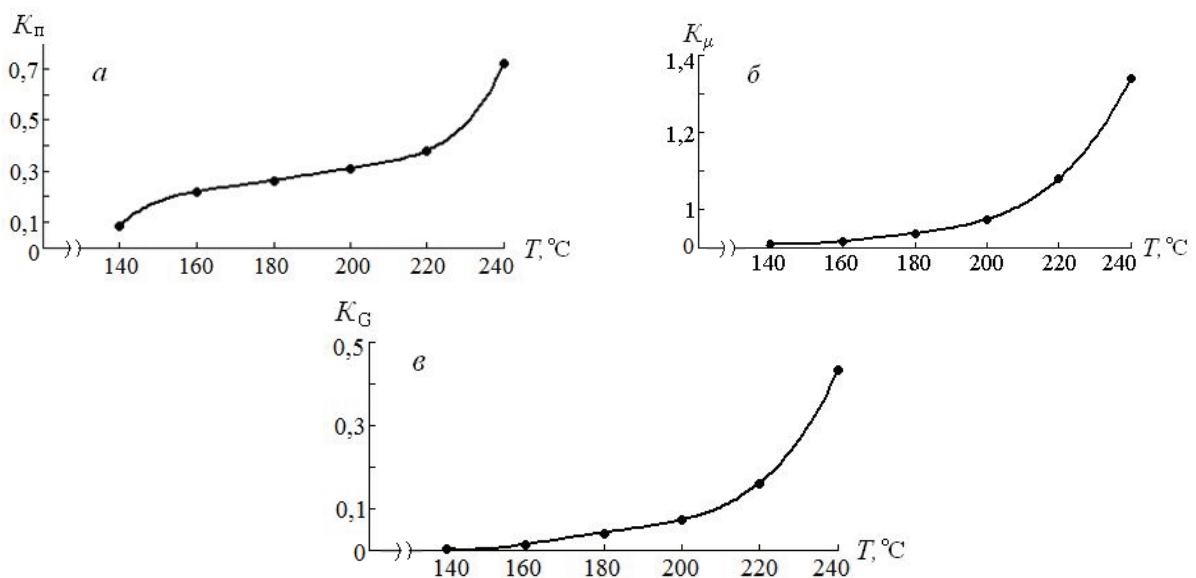


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициентов: а) поглощения светового потока  $K_n$ ; б) относительной вязкости  $K_{\mu}$ ; в) летучести  $K_G$

при термостатировании вначале падает при температуре испытания 140 °С на 10 %, а затем по параболической зависимости (рис. 1, б) увеличивается, причем при температуре  $\approx 205$  °С достигает значения вязкости исходного масла.

При температуре 240 °С относительная вязкость масла увеличивается на 34 %. Падения вязкости можно объяснить деструкцией вязкостной присадки и базовой основы, а увеличение – образованием продуктов деструкции и испарением легких фракций. Это подтверждается зависимостью коэффициента летучести  $K_G$  (рис. 1, в) от температуры испытания. С ростом температуры испытания летучесть увеличивается, а тенденция ее роста аналогична изменению коэффициента относительной вязкости, т. е. с увеличением летучести повышается вязкость.

Влияние продуктов деструкции на вязкость испытуемого масла оценивалось зависимостью  $K_\mu = f(K_\pi)$  (рис. 2), из которой видно, что с увеличением коэффициента  $K_\pi$  до значений, равных 0,22 ед., вязкость практически не изменяется, а при значении  $K_\pi$ , изменяющемся от 0,22 до 0,72 ед., она резко увеличивается, что соответствует температурам испытания от 160 до 240 °С (рис. 1, а). Такая тенденция изменения вязкости зависит от состава продуктов деструкции, меняющегося от жидкого состояния в полужидкое, а затем в твердое. Наибольшее влияние на вязкость оказывают полужидкие (гелеобразные) продукты, которые были установлены после центрифугирования термостатированных проб масла.

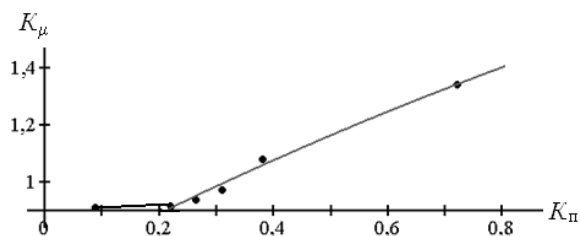


Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока

Связь между коэффициентами поглощения светового потока и летучестью представлена на рис. 3. Установлено, что эта зависимость имеет линейный характер. Зависимость коэффициента относительной вязкости от коэффициента летучести имеет линейный характер, рис. 4. На вязкость также оказывают влияние гелеобразные продукты деструкции.

Температурную стойкость различных масел можно оценивать по значениям коэффициентов поглощения светового потока и летучести. Процесс преобразования избыточной тепловой энергии протекает одновременно и вызывает изменение оптических свойств и летучести масла, сумма коэффициентов  $K_\pi$  и  $K_G$  определяет коэффициент температурной стойкости  $\Pi_{тс}$ , рис. 5.

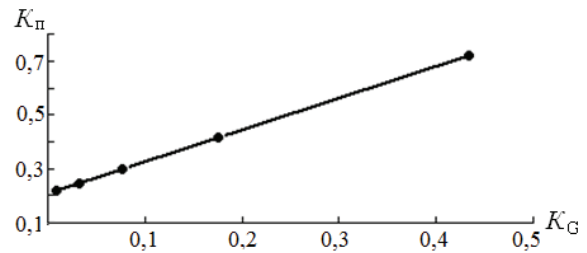


Рис. 3. Взаимосвязь коэффициента поглощения светового потока и коэффициента летучести

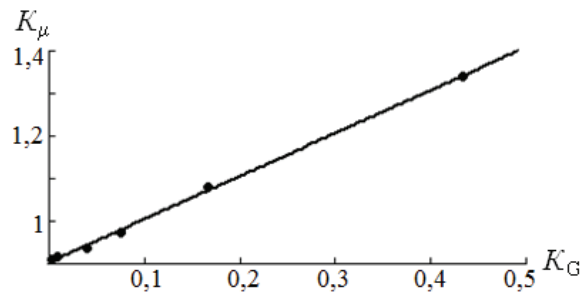


Рис. 4. Взаимосвязь коэффициента относительной вязкости и коэффициента летучести

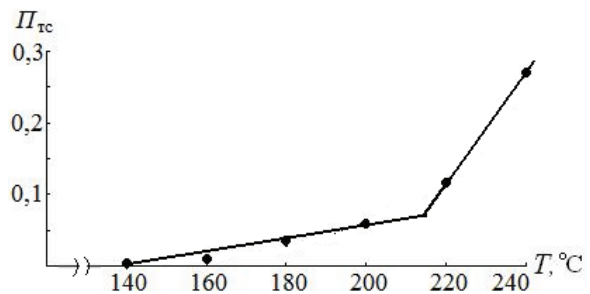


Рис. 5. Зависимость показателя температурной стойкости от температуры испытания

Противоизносные свойства минерального моторного масла оценивались на машине трения, причем обойма подшипника термостатировалась вместе с маслом, и на ее поверхности образовались соединения (покрытия) от светло-синего до темно-синего цвета в зависимости от температуры. Противоизносные свойства оценивались при испытании обоймы с покрытием и без него. Это позволило оценить износостойкость покрытий и влияние температуры на ее механическую прочность. Так как основное влияние на противоизносные свойства должны оказывать продукты деструкции, влияющие на оптические свойства масла, то исследована зависимость диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока (рис. 6).

При испытании обоймы без покрытия (кривая 1) износ шаров в интервале значений  $K_\pi$  от 0 до 0,72 ед. изменяется незначительно, в пределах от 0,23 до 0,34 мм. При испытании обоймы с покрытием износ увеличивается до 0,54 мм (кривая 2). Однако износ обоймы без покрытия и с ним мало различается при значениях  $K_\pi < 0,22$  ед., что соответствует температуре испытания 160 °С. Можно полагать, что она является предельной температу-

рой работоспособности подшипниковой стали и при ней начинают образовываться гелеобразные продукты деструкции, отрицательно влияющие на покрытие и вызывающие повышенный износ. Вероятно, что при температуре выше 160 °С противоизносные присадки теряют свои функции.

Влияние продуктов деструкции на износ стали ШХ15 с покрытием и без него оценивалось показателем относительного износа  $K_{\Pi}$

$$K_{\Pi} = I_{\text{тс}} / I_{\text{тм}},$$

где  $I_{\text{тс}}$  — износ шаров при испытании термостатированного масла при трении по обойме с покрытием и без него;  $I_{\text{тм}}$  — износ шаров при испытании по обойме без покрытия в товарном масле.

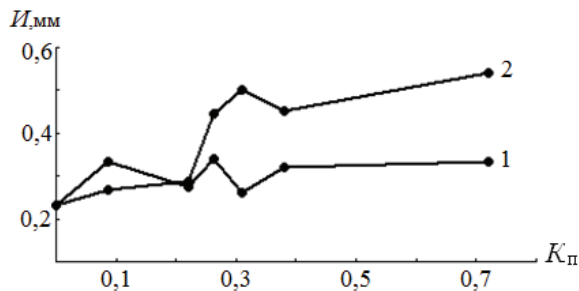


Рис. 6. Взаимосвязь величины износа  $I$  и коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  без покрытия обоймы (кривая 1) и с покрытием (кривая 2)

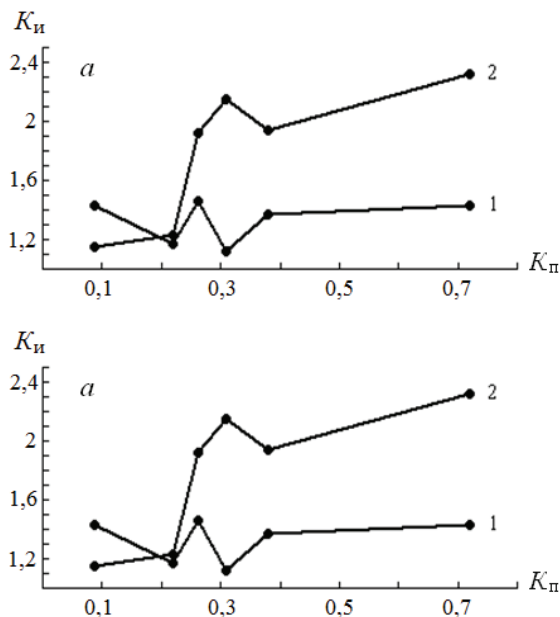


Рис. 7. Зависимость: а) коэффициента износа  $K_{\Pi}$  и б) показателя износостойкости стали ШХ15 от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  при исследовании стали без покрытия (кривая 1) и с покрытием (кривая 2)

С увеличением коэффициента  $K_{\Pi}$  (рис. 7, а) износ шаров при испытании термостатированного

масла по обойме без покрытия (кривая 1) изменяется максимум в 1,4 раза, а при испытаниях с покрытием (кривая 2) он увеличивается в 2,3 раза по сравнению с товарным маслом. Наблюдается резкое увеличение коэффициента износа  $K_{\Pi}$  с покрытием при значениях  $K_{\Pi} < 0,22$  ед., что соответствует температуре испытания 160 °С.

Влияние продуктов деструкции на износ стали ШХ15 оценивалось показателем износостойкости  $\Pi_{\Pi}$

$$\Pi_{\Pi} = K_{\Pi} / K_{\Pi},$$

где  $K_{\Pi}$  — коэффициент поглощения светового потока при термостатировании масла с обоймой подшипника;  $K_{\Pi}$  — коэффициент износа стали с покрытием и без него.

Физический смысл данного показателя определяет количество продуктов деструкции, приходящееся на единицу изменения коэффициента износа. Как видно из рис. 7, б, (кривая 2), покрытие снижает концентрацию продуктов деструкции на поверхности трения, поэтому износостойкость стали ШХ15 падает по сравнению со сталью без покрытия. Подтверждается тот факт, что при увеличении коэффициента  $K_{\Pi}$  до значения 0,22 (температура испытания 160 °С) кривые 1 и 2 незначительно различаются, а при  $K_{\Pi} > 0,22$  показатель износостойкости резко падает.

## Выводы

1. Методика исследования температурной стойкости смазочных материалов, включающая контроль изменения их оптических свойств, вязкости и летучести, позволяет определить кинетику деструкции присадок, выявить влияние концентрации продуктов деструкции на противоизносные свойства термостатированных масел.
2. Показано, что при температуре 240 °С и выше процессы деструкции в минеральном масле М10-Г<sub>2</sub>к протекают более интенсивно, а коэффициенты поглощения светового потока, летучести и вязкости приобретают максимальные значения. При значениях коэффициента поглощения светового потока, не превышающих 0,22 ед., вязкость практически не изменяется, а в диапазоне изменения этого коэффициента от 0,22 до 0,72 ед. она резко увеличивается. При термостатировании масла М10-Г<sub>2</sub>к установлена линейная зависимость между вязкостью и летучестью.
3. Износостойкость стали ШХ15 снижается при температуре испытания масла М10-Г<sub>2</sub>к выше 160 °С за счет образования на поверхности трения химических соединений продуктов деструкции со сталью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. — 1985. — Т. 6. — № 2. — С. 201–212.
2. Буяновский И.А. и др. Влияние покрытий-ориентантов на энергию активации разрушения граничного слоя // Трение и износ. — 2007. — Т. 28. — № 1. — С. 15–20.
3. Лашхи В.Л. и др. Исследование эффективности действия антифрикционных присадок к моторным маслам // Трение и износ. — 1982. — Т. 3. — № 6. — С. 988–993.
4. Устройство для испытания трущихся материалов и масел: а.с. 983522 СССР; опубл. 1982, Бюл. № 47.
5. Способ определения смазывающей способности масел: а.с. 1054732 СССР; опубл. 1983, Бюл. № 42.

Поступила 14.12.2009 г.

УДК 577.3.01;577.38

## ФОРМИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ В ДВУМЕРНОЙ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКЕ С НЕЛОКАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.В. Борисов\*, А.Ю. Трифонов, А.В. Шаповалов\*

Томский политехнический университет

\*Томский государственный университет

E-mail: trifonov@tpu.ru

Численными методами исследовано влияние нелокального взаимодействия на динамику популяции в двумерной реакционно-диффузионной модели. Динамическое уравнение модели обобщает известное уравнение Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова и учитывает нелокальное взаимодействие особей в популяции различных типов, включая таксис. При определенном выборе параметров модели получена двумерная диссипативная структура, образованная так называемыми таксисными кольцами. Обсуждаются свойства полученной структуры.

### Ключевые слова:

Популяционная динамика, численные методы, модель Фишера, популяционные структуры.

### Key words:

Population dynamics, population waves, Fisher-Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov model.

## Введение

В работе численными методами исследуется двумерная модель динамики роста популяции микроорганизмов с нелокальным взаимодействием.

Моделирование двумерной динамики представляет особый интерес, что связано с условиями экспериментальных исследований роста бактериальных или клеточных популяций. Обычно такие исследования проводятся в чашке Петри, плоское круговое дно которой заполняется тонким слоем питательной среды, а небольшое количество культуры вносится (инокулируется) в центр, равноудаленный от границы чашки. Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований показали [1–5], что популяции микроорганизмов представляют собой организованное сообщество (колонию), более устойчивое к влиянию неблагоприятных воздействий, чем простая совокупность особей. Непосредственно наблюдаемым проявлением колониального поведения популяции микроорганизмов является формирование неоднородных пространственных структур (морфогенез) в процессе роста популяции.

Одной из фундаментальных проблем математического моделирования популяционной динамики является описание морфогенеза колоний микроор-

ганизмов. Для решения этой проблемы пробуются различные подходы и типы моделей (непрерывные и дискретные, локальные и нелокальные, детерминистические и стохастические и др.), так как поведение колоний микроорганизмов является многофакторным.

В данной работе исследуется влияние нелокального нелинейного взаимодействия в популяции на процесс формирования двумерной пространственно неоднородной структуры в рамках реакционно-диффузионной модели, обобщающей известную модель Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова (ФКПП) [6, 7]. Нелокальное обобщение уравнения ФКПП рассматривалось в [8–10]. Динамическое уравнение модели в двумерном случае записывается в виде:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + a(x, y, t)u(x, y, t) - \kappa u(x, y, t) \int_{-\infty}^{\infty} b(x, y, x_1, y_1, t) u(x_1, y_1, t) dx_1 dy_1. \quad (1)$$

Здесь  $u(x, y, t)$  — кинетическая переменная (массовая плотность популяции или число организмов